

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет о НИР (промежуточный) «Анализ опыта управления риском, идентификация опасностей и оценка критериев риска, управление риском при эксплуатации газораспределительных систем Республики Беларусь». – ГАЗ-ИНСТИТУТ, 2012

УДК 621.644.029

**МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РОСТА ПРОТЯЖЕННОСТИ
КОРРОЗИОННО-ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ ГАЗОПРОВОДОВ,
ТРЕБУЮЩИХ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ
ЛИБО СНИЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ДАВЛЕНИЯ**

А. Ю. Прокопенко, С. В. Нефёдов

ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий «Газпром ВНИИГАЗ», Московская область, Россия

На основе данных внутритрубной дефектоскопии (ВТД), накапливаемых в информационной системе оценки технического состояния технологических объектов ОАО «Газпром» (ИСТС «Инфотех») [1], проведен анализ распределения дефектов и оценка технического состояния участков линейной части магистральных газопроводов (ЛЧ МГ) нескольких газотранспортных предприятий. Оценка опасности дефектов проводилась в соответствии с документами [2, 3]. Для оценки технического состояния были выбраны следующие показатели: относительная глубина дефекта, допускаемое давление трубы с дефектом, расчетная календарная продолжительность работы труб с развивающимися дефектами, в течение которой расчетное разрушающее давление снизится до проектного (в дальнейшем – наработка до ремонта). Скорость коррозии принималась как отношение максимальной глубины коррозионного дефекта, обнаруженного на участке к времени эксплуатации за вычетом срока службы защитного покрытия (принятого равным 6 или 10 годам для пленочной или битумной изоляции).

В дальнейшем в целях сокращения объема данной статьи будем представлять на рисунках и в таблицах исходные данные и разработанный метод на примере одного из участков ЛЧМГ протяженностью 205 км, т.к. между частотами распределений показателей опасности дефектов на всех анализируемых участках наблюдается достаточно высокий показатель

корреляции ($K_{корр} > 0,96$). На рис. 1 и в табл. 1 представлено распределение дефектных зон труб по относительной глубине, наработке до ремонта и допускаемому рабочему давлению на выбранном участке ЛЧ МГ, а также распределение протяженности участков со сниженным допускаемым рабочим давлением.

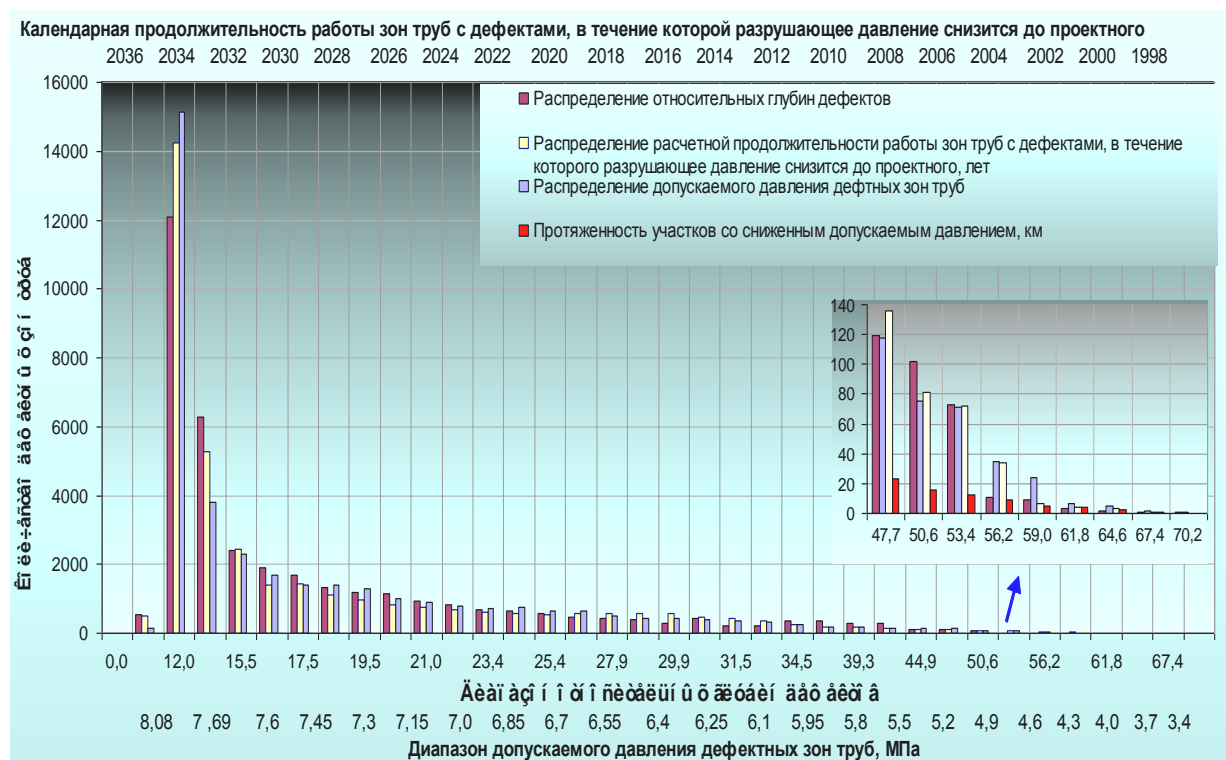


Рис. 1. Распределение дефектов по глубине, наработки до ремонта и допускаемому давлению зон труб

С увеличением глубины дефекта снижаются наработка до ремонта и допускаемое давление для дефектной зоны трубы. По итогам расчетов на каждом из анализируемых участков была выявлена корреляционная связь между частотой распределения глубин дефектов, частотой распределения наработки до ремонта и частотой допускаемого рабочего давления дефектных зон труб.

При расчетах принимались стабильные характеристики механических свойств стали, определенные ТУ на поставку труб. Учитывалась информация только по результатам ВТД без данных о проведенных шурфованиях, уточнении размеров дефектов и состояния изоляции; не учитывалась возможная деградация механических свойств трубных сталей при длительной эксплуатации ЛЧ МГ.

Таблица 1

Распределение показателей степени опасности дефектов на выбранном участке ЛЧМГ протяженностью 205 км

Диапазон относительных глубин дефектов	Частота распределения глубин дефектов, d_i	Диапазон наработки до ремонта дефектных зон труб, d_i , лет	Частота распределения наработки до ремонта дефектных зон труб, t_i	Диапазон допустимого давления, МПа	Частота распределения количества дефектных зон труб с допустимым рабочим давлением, P_i
0 – 18,7	23197	2029,3 ... 2037	23768	8,1 – 7,88	22895
18,7 – 23,3	6274	2020 ... 2029,3	6488	7,88 – 7,48	7035
23,3 – 30,3	3992	2014 ... 2020	3505	7,48 – 6,9	3663
30,3 – 37,3	1733	2009,35... 2014	1606	6,9 – 6,1	1803
37,3 – 45,1	713	2006 ... 2009,35	525	6,1 – 5,5	496
45,1 – 50,6	221	2006 ... 2004	226	5,5 – 4,9	217
50,6 – 56,2	84	2004...2002	97	4,9 – 4,3	106
56,2 – 61,8	12	2002...2000	10	4,3 – 3,7	11
61,8 – 67,4	3	2000...1998	4	3,7 – 3,1	4
67,4 – 70	1	1998...1996	1	≤ 3,1	0
$K_{кopp\ di - ti} = 0,98$		$K_{кopp\ di - Pi} = 0,97$		$K_{кopp\ ti - Pi} = 0,963$	

Таблица 2

Распределение показателей оценки опасности дефектов и протяженности участков
с различным допускаемым давлением на выбранном участке ЛЧМГ протяженностью 205 км

Частота распределения дефектных зон труб с допускаемым давлением	Диапазон допускаемого рабочего давления, МПа	Общая протяженность участков, подлежащих ремонту, с соответствующим допускаемым давлением, км
338	$\leq 5,5$	23,1
202	$\leq 5,2$	15,6
121	$\leq 4,9$	12,8
49	$\leq 4,6$	9,5
15	$\leq 4,3$	5,1
8	$\leq 4,0$	3,9
4	$\leq 3,7$	2,1
1	$\leq 3,4$	0,8
$K_{корр} = 0,95$		

На анализируемых участках линейной части газотранспортных предприятий коэффициенты корреляции составляют величину, близкую к единице:

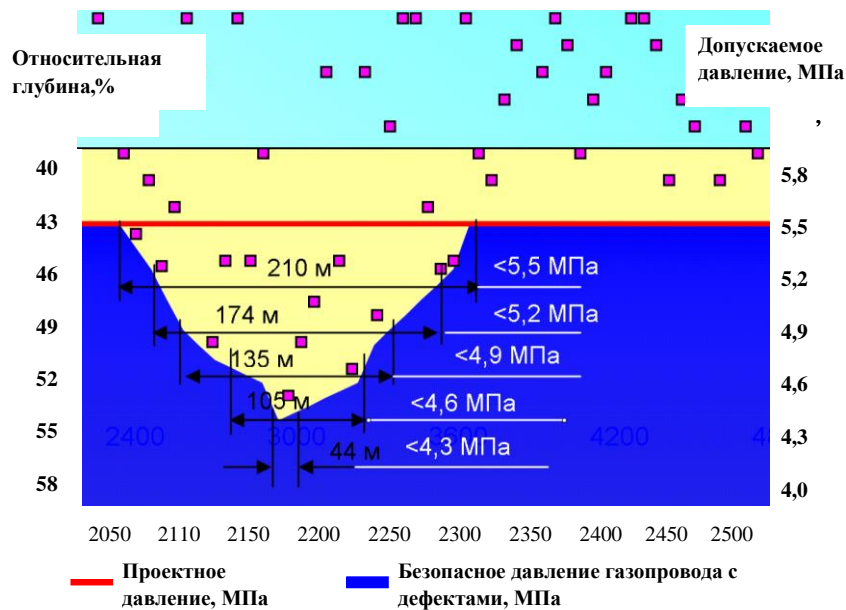
- а) между распределением относительных глубин дефектов и распределением наработки до ремонта соответствующих дефектных зон труб;
- б) распределением относительных глубин дефектов и распределением соответствующих зон труб с допускаемым рабочим давлением;
- в) распределением наработки до ремонта дефектных зон труб и распределением этих зон труб с допускаемым рабочим давлением.

Учитывая, что наибольшая доля затрат приходится на методы капитального ремонта «заменой труб» и «переизоляции с частичной заменой труб», а метод выборочного ремонта ЛЧ МГ в силу технологических и экономических требований существенно меньше по объемам, авторами поставлена задача выбора наиболее эффективного варианта на основе прогнозирования протяженности участков газопроводов, требующих снижения давления, либо капитального ремонта переизоляцией с частичной заменой труб. Назовем такие участки потенциально ремонтными (далее – ПРУ). Предметом дальнейшего анализа является не только взаимосвязь между вышеупомянутыми распределениями показателей опасности дефектов, но и взаимосвязь между распределениями этих показателей и протяженностью ПРУ.

Для прогнозирования изменения протяженности ПРУ необходимо учитывать, что на практике при ежегодном ремонте в большинстве случаев происходит замена труб не только с критическими дефектами, но и с соседними, менее опасными дефектами, не требующими снижения давления, но также находящимися в пределах участка.

На рис. 2 представлены два таких опасных участка (ПРУ). Каждый ПРУ характеризуется протяженностью и рекомендуемым допускаемым давлением по наиболее опасному дефекту. Представлены расчет допускаемого давления и принцип расчета протяженности опасных участков. Коэффициент запаса K рассчитывался в соответствии с [2], допускаемое давление p_{don} , разрушающее давление p_p и коэффициент Q , учитывающий длину коррозионного дефекта, рассчитывались в соответствии с [3].

Протяженность ПРУ рассчитывалась как расстояние между двумя крайними дефектами, принадлежащими одному диапазону давления и относительной глубины. Для участков с рабочим давлением 5,5 МПа приняты следующие диапазоны давления: 5,5 – 5,2 МПа, 5,2 – 4,9 МПа, 4,9 – 4,6 МПа, и т.д. – с шагом 0,3 МПа. На каждом участке между КС общая протяженность ПРУ формируется из некоторого ряда локальных ПРУ.



Расчет коэффициента запаса в соответствии со СНиП 2.05.06.-85*:

$$K = \frac{0,9\gamma n_p k_1 k_n}{m}.$$

Расчет допускаемого давления трубы с дефектом
в соответствии с СТО Газпром 2-2.3-112-207:

$$p_d = \frac{2t\sigma_{ep}\left(1 - \frac{d}{t}\right)}{(D_n - t)\left(1 - \frac{d}{tQ}\right)};$$

$$Q = \sqrt{1 + 0,31\left(\frac{1}{\sqrt{D_n t}}\right)^2}; \quad p_{don} = \frac{p_p}{K};$$

D_n – наружный диаметр трубы; t – толщина стенки трубы; d – глубина дефекта

Рис. 2. Расчет допускаемого давления и принцип расчета
общей протяженности опасных участков по результатам расчета НДС газопровода

Далее необходимо определить тип функциональной зависимости между рядами распределения следующих параметров – количества дефектных зон труб с допускаемым давлением N_p и протяженностью участков с соответствующим допускаемым давлением L_p (или между распределениями количества относительных глубин дефектов N_d и количеством дефектных зон труб с допускаемым давлением N_p). Используем метод наименьших квадратов [4] относительно следующей интерполяционной зависимости:

$$L_p = f(N_p). \quad (1)$$

Методом наименьших квадратов минимизируется функция

$$S = \sum_{k=1}^n [L_k - f(N_{pk})]^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Уравнение регрессии будем искать в форме полинома некоторой степени z :

$$L_p = a_0 + a_1 N_p + a_2 N_p^2 + \dots + a_z N_p^z, \quad (3)$$

коэффициенты которого определяются из условия получения наименьшего значения суммы квадратов отклонений расчетных значений разностей:

$$S = \sum_p m_{N_p} (\bar{L}_{N_p} - a_0 - a_1 N_p - a_2 N_p^2 - \dots - a_z N_p^z)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где m_{N_p} – частота значений L_{N_p} по N_p ;

\bar{L}_{N_p} – среднее значение L_{N_p} по N_p .

Выбор оптимального решения производится среди неотрицательных, неубывающих функций со степенью z , максимально отвечающей требованию авторов к показателю детерминированности или достоверности аппроксимации (показатель должен быть наибольшим):

$$R^2 \rightarrow \max. \quad (5)$$

Величина R^2 , выражающая степень близости рядов фактических значений и значений, полученных из уравнения регрессии, вычисляется как

$$R^2 = \frac{\sigma^2(\bar{L}_{N_p})}{\sigma_L^2}, \quad (6)$$

где $\sigma^2(\bar{L}_{N_p}) = \frac{1}{N-1} \sum m_{N_p} (L_{N_p} - \bar{L})^2$ – дисперсия средних \bar{L}_{N_p} около их общей средней \bar{L} ;

$\sigma_L^2 = \frac{1}{N-1} \sum m_L (L - \bar{L})^2$ – дисперсия L около общей средней \bar{L} .

Функцию $L_{N_p} = f(N_p)$ аппроксимируем также следующими распределениями: линейным, логарифмическим, экспоненциальным и степенным. Окончательно выбираем функцию, в максимальной степени отвечающую заданным ограничениям. Результат определения корреляционной функциональной зависимости между распределениями количества относительной глубины дефектов N_d и количества зон труб с допускаемым рабочим давлением N_p представлен на рис. 3, между распределением дефектов в диапазонах

допускаемого давления и протяженности участков с соответствующим допускаемым давлением на выбранном участке ЛЧ МГ – на рис. 4.

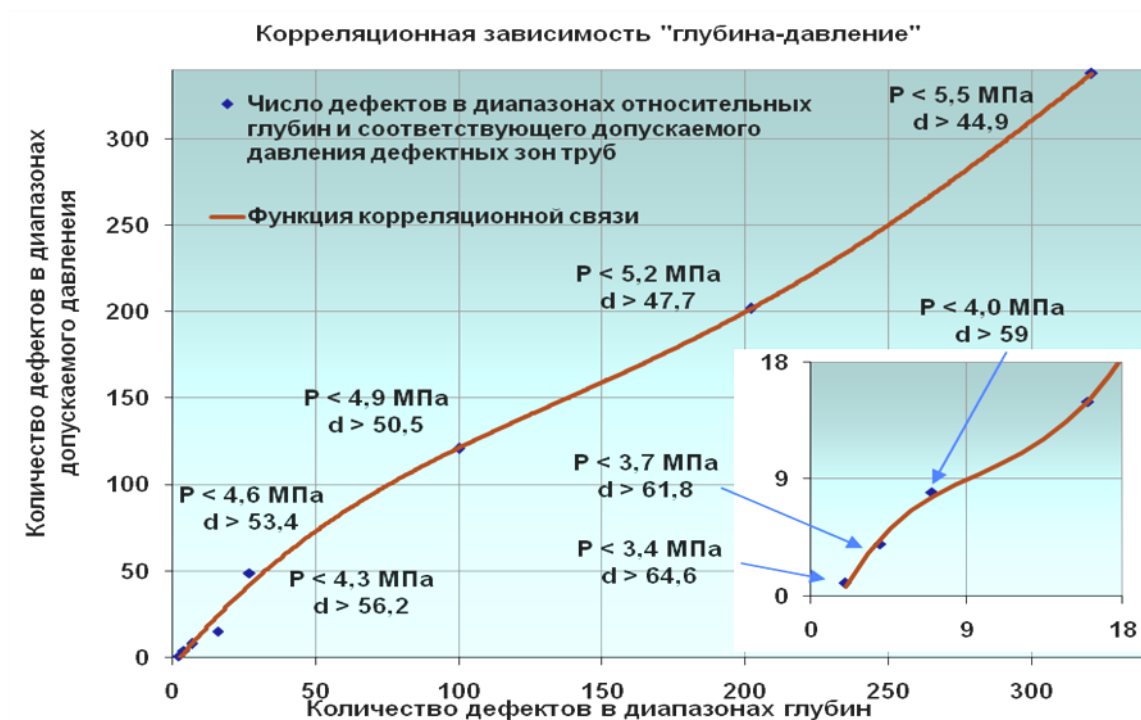


Рис. 3. Корреляционная связь между рядами относительных глубин дефектов и допускаемого давления дефектных зон труб

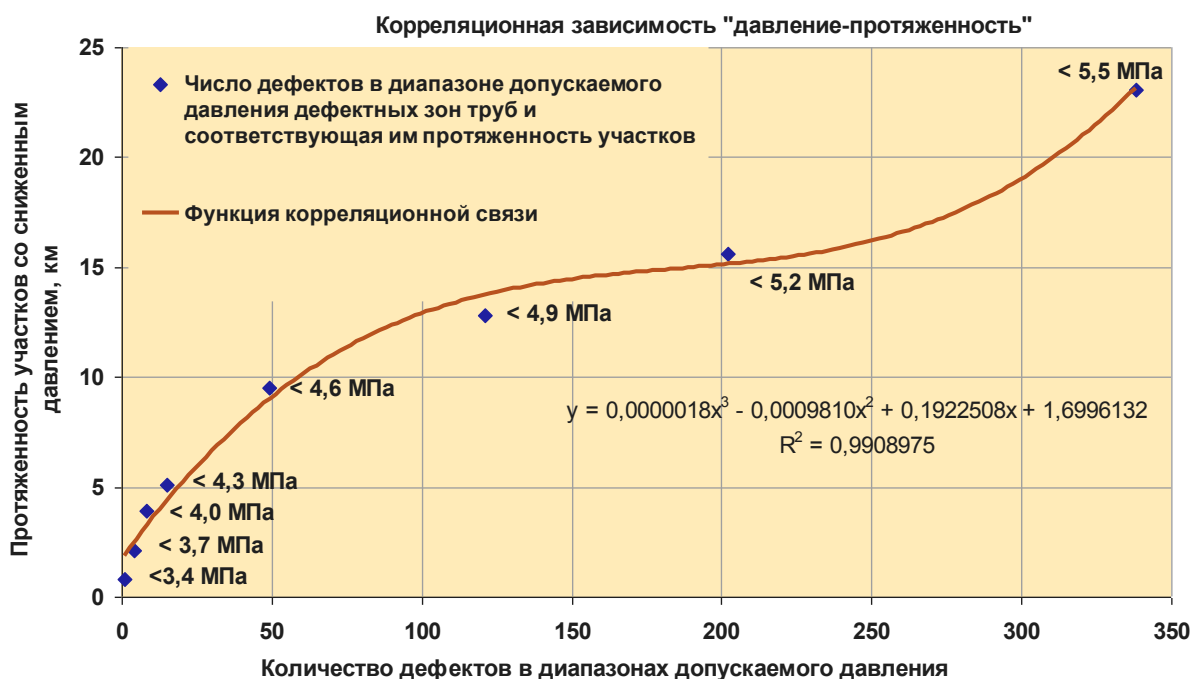


Рис. 4. Корреляционная связь между рядами распределения дефектов в диапазонах допускаемого давления и протяженностью участков с допускаемым давлением

Функции имеют следующий вид:

а) между распределением дефектов в диапазонах глубин и распределением соответствующих дефектных зон труб в диапазонах допускаемого давления:

$$N_p = f(N_d) = -4 \cdot 10^{-8} x^4 + 4 \cdot 10^{-5} x^3 - 0,0112 x^2 + 2,036 x - 5,32;$$

$$R^2 = 0,99;$$

б) между распределением дефектов в диапазонах допускаемого давления и протяженностью участков с допускаемым давлением:

$$L_{Np} = f(N_p) = 1,004x^{0,545};$$

$$R^2 = 0,96.$$

Таким образом, установлена корреляционная связь между распределениями следующих параметров:

- 1) относительных глубин дефектов и наработки до ремонта дефектных зон труб;
- 2) относительных глубин дефектов и количества зон труб с допускаемым давлением;
- 3) наработки до ремонта дефектных зон труб и количества зон труб с допускаемым давлением;
- 4) относительных глубин дефектов свыше 45,1 ($d > 45,1$) и протяженности участков с допускаемым давлением ниже проектного;
- 5) количества дефектных зон труб с допускаемым давлением и протяженностью участков с соответствующим допускаемым давлением;
- 6) наработки до ремонта дефектных зон труб и протяженностью участков с допускаемым давлением ниже проектного.

Если ремонтные работы на газопроводе не проводятся, происходит рост дефектов, как следствие – рост протяженности отдельных локальных ПРУ и снижение безопасного допускаемого давления на каждом из них, а также возникновение новых ПРУ. Соседние локальные ПРУ постепенно «объединяются» и образуют один протяженный ПРУ с допускаемым давлением ниже проектного по самому опасному дефекту. Этот процесс проиллюстрирован на рис. 5.

В основе прогнозирования динамики роста протяженности ПРУ в последующие годы после обследования заложена модель роста количества и степени опасности дефектов на участке ЛЧ МГ (модель, предложенная в статье «Имитационный метод прогнозирования развития коррозионной поврежденности магистральных газопроводов») и корреляционная модель взаимосвязи количества дефектных зон труб в диапазонах допускаемого

давления и протяженности участков в диапазонах соответствующего допускаемого давления «давление-протяженность»:

$$N_{P_j}^g = N_{P_j}^g (1 - k_{P_j}) + N_{P_{j-1}}^{g-1} k_{P_{j-1}},$$

$$L_{P_i}^g = f(N_{P_j}^g). \quad (7)$$

где $L_{P_i}^g$ – протяженность ПРУ в i -том диапазоне допускаемого давления в g -м году;

$N_{P_j}^g$ – количество дефектных зон труб в j -том диапазоне значения допускаемого давления в g -м году.

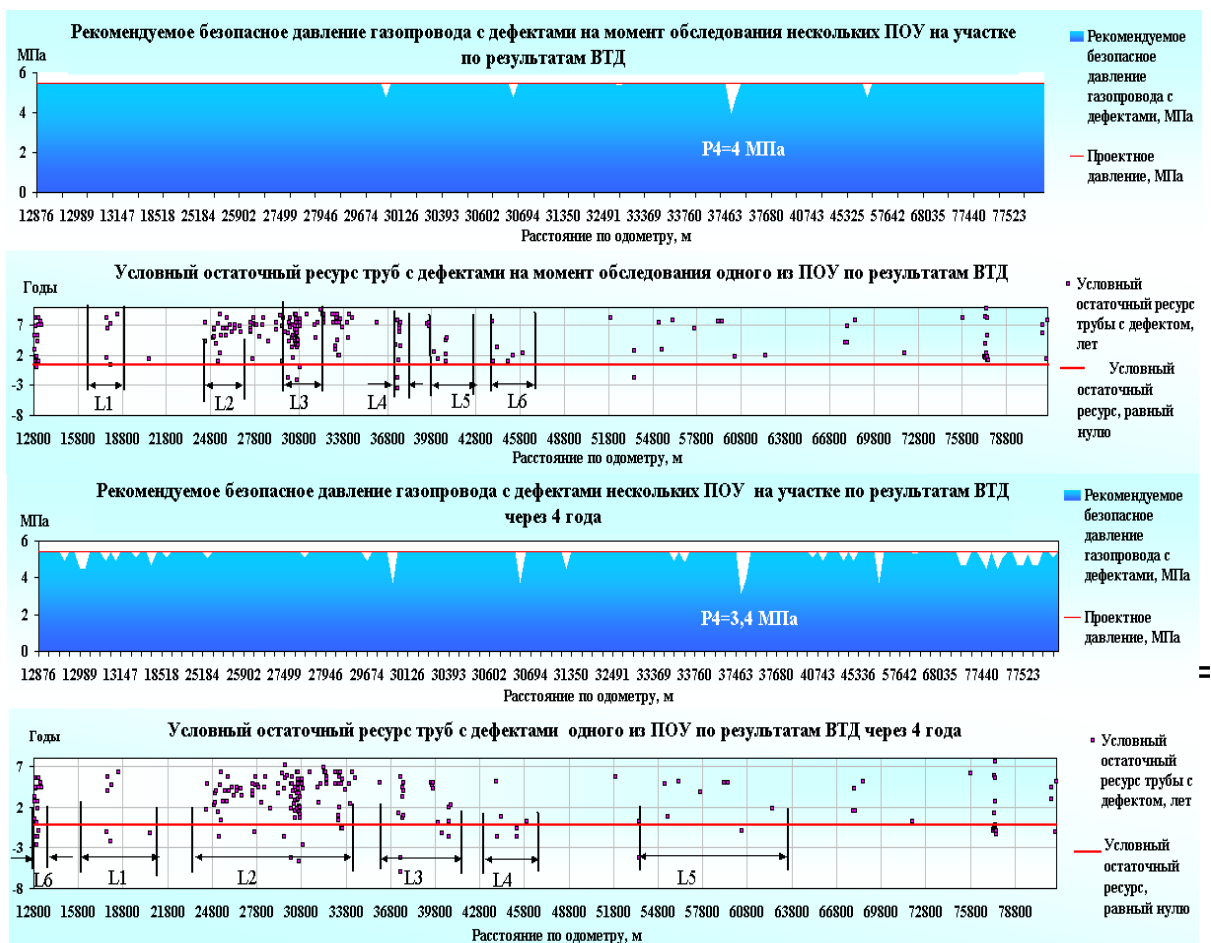


Рис. 5. Прогноз изменения величины допускаемого давления и роста протяженности ПРУ

В качестве показателя степени опасности используется допускаемое давление, т.к. удобней прогнозировать рост протяженности участков с допускаемым давлением ниже проектного через корреляционные связи между распределением дефектных зон труб в диапазонах допускаемого давле-

ния и протяженностью участков с давлением ниже проектного. То есть сначала по результатам расчета НДС на участке ЛЧ МГ получаем распределение дефектных зон труб с допускаемым давлением, затем моделируем изменение этого распределения во времени и далее на основе выявленных корреляций «давление-протяженность» прогнозируем протяженность участков в диапазонах соответствующего допускаемого давления.

Прогноз роста протяженности участков в диапазонах допускаемого давления ниже проектного на расчетном участке на основе модели (7) представлен на рис. 6. Протяженность, рекомендуемая к ремонту сплошной заменой труб или переизоляции с частичной заменой труб на момент обследования, составляет 23,1 км, а с учетом результатов моделирования количественного роста дефектов в период до 2020 г. без проведения ремонтных мероприятий – почти 104 км, т.е. 50,7%.

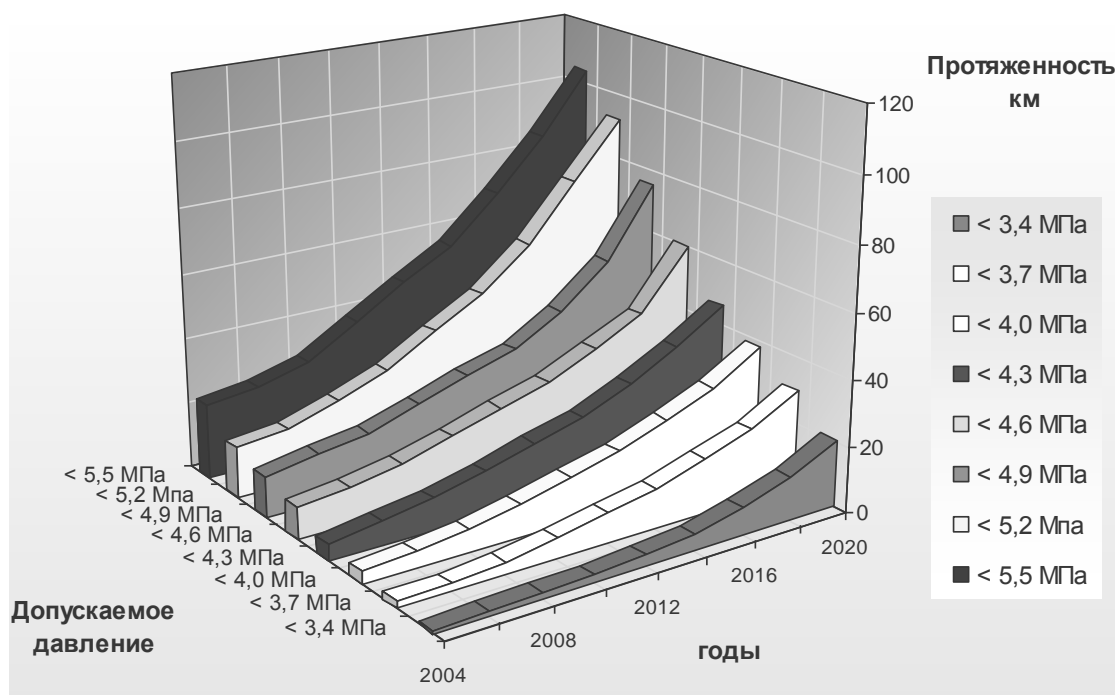


Рис. 6. Прогноз роста протяженности участков со сниженным рабочим давлением

Таким образом, между выбранными рядами распределений показателей опасности коррозионных дефектов на участках ЛЧ МГ (относительных глубин дефектов, допускаемого давления зон труб с дефектами, наработки до ремонта дефектных зон труб, протяженностью участков газопроводов, требующих проведения ремонта или снижения рабочего давления) выявлены корреляционные связи. Разработан метод прогнозирования роста протяженности коррозионно-опасных участков газопроводов, требующих

проведения ремонтных мероприятий либо снижения рабочего давления. Метод полезен для применения в задачах планирования и перераспределения объемов капитального ремонта МГ по участкам ГТС с различными требованиями к поддержанию величины рабочего давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. База данных информационной системы оценки технического состояния объектов ЕСГ «Инфотех» ОАО «Оргэнергогаз». – Режим доступа: <https://www.oeg.gazprom.ru>.
2. СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП Минстрой РФ, 1998. – 60 с.
3. СТО Газпром 2-2.3-112-2007. Методические указания по оценке работоспособности участков магистральных газопроводов с коррозионными дефектами. – М.: ООО ИРЦ Газпром, 2007. – 62 с.
4. Длин, А.М. Математическая статистика в технике / А.М. Длин. – М.: Сов. наука, 1958. – 460 с.